第 46 卷 第 8 期
2023 年 8 月

核 技 术 NUCLEAR TECHNIQUES
www.hjs.sinap.ac.cn

Vol.46，No.8
August 2023

中国锦屏地下实验室与稀有物理实验

王钰锋 刘家璇 杨丽桃 曾 志 马 豪 岳 骞

（清华大学 工程物理系 北京 100084）

摘要 中国锦屏地下实验室是目前世界上岩石覆盖最深的深地实验室，对宇宙线μ子具有良好的屏蔽作用，具有极低的宇宙线通量，因此适用于开展对稀有物理事例的探测实验。目前，包括中国暗物质实验（China Dark matter EXperiment，CDEX）、粒子和天体物理氙实验（Particle and Astrophysical Xenon Experiments，PandaX）、锦屏深地核天体物理实验装置（Jinping Underground Nuclear Astrophysics Experiment，JUNA）等实验组已经入驻锦屏实验室，对暗物质直接探测、无中微子双β衰变、天体核反应等一系列稀有物理事例进行实验探测，并给出了一系列国际先进水平的研究成果。本文总结了中国锦屏地下实验室自成立以来的发展过程和本底控制情况，并对实验室中各个实验组所开展实验的物理意义、实验原理、关键技术、物理成果等进行介绍，同时给出实验组接下来的实验计划。

关键词 中国锦屏地下实验室，暗物质，无中微子双β衰变，CDEX，PandaX，JUNA

中图分类号 TL99，TL81，O57

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080018

关联视频 DOI: 10.12351/ks.2208.0961



Rare physical events at China Jinping underground laboratory

WANG Yufeng LIU Jiaxuan YANG Litao ZENG Zhi MA Hao YUE Qian

(*Department of Engineering Physics*, *Tsinghua University*, *Beijing 100084*, *China*)

Abstract China Jinping Underground Laboratory (CJPL) has the deepest rock overburden in the world, which considerably shields the detectors from muons. Thus, it has ultra-low radiation background level and is useful for experiments investigating rare physical events. Previously, experiments including the CDEX (China Dark matter EXperiment), PandaX (Particle and Astrophysical Xenon Experiments), JUNA (Jinping Underground Nuclear Astrophysics Experiment), and neutrino experiment have been carried out at CJPL and have given good results in dark matter detection, neutrinoless double beta decay, and more. This review introduces the construction process of CJPL, and introduces the facilities, results, and future plans of the aforementioned experiments. The CDEX used a high-purity germanium detector array for the dark matter detection and neutrinoless double-beta decay searches; whereas, for the same searches, PandaX used a dual-phase liquid xenon time projection chamber detector. A proton and helium accelerator was used by JUNA to simulate four nuclear reactions that occur in the Universe. A 10^3-kg prototype was constructed for feasibility verification by the neutrino experiment. The CDEX, PandaX, and JUNA collaboration groups give their latest results, all of which have approached or replaced the best results in the world. These experiments verify the extraordinary experimental conditions at CJPL. With the construction of CJPL-II, we expect an increase in the number of experiments based in Jinping and for further significant results to be achieved.

Key words China Jinping Underground Laboratory, Dark matter, Neutrinoless double-beta decay, CDEX, PandaX, JUNA

国家重点研发计划项目(No.2017YFA0402200)资助

第一作者：王钰锋，男，2000年出生，2021年毕业于清华大学，研究领域为粒子物理实验

通信作者：刘家璇，E-mail：liujiaxu21@mails.tsinghua.edu.cn；杨丽桃，E-mail：yanglt@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期：2023-02-09，修回日期：2023-04-13

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2017YFA0402200)

First author: WANG Yufeng, male, born in 2000, graduated from Tsinghua University in 2021, focusing on particle physics experiment

Corresponding author: LIU Jiaxuan, E-mail: liujiaxu21@mails.tsinghua.edu.cn; YANG Litao, E-mail: yanglt@mail.tsinghua.edu.cn

Received date: 2023-02-09, revised date: 2023-04-13

物理学中有一类事例，因为反应截面极小或者半衰期极长，预期的反应事例率极小，这种事例称为稀有物理事例。为降低环境本底，特别是宇宙线μ子的干扰，这类稀有物理事例的探测通常选择在地下实验室进行。2009年前，中国还没有这类地下实验室，相关实验只能到国外地下实验室进行。2009年，清华大学联合雅砻江流域水电开发有限公司，利用雅砻江公司建设锦屏水电站工程中开挖的交通隧道，在17.5 km长的锦屏交通隧道中部建设了可用容积达4 000 m^{3}的中国锦屏地下实验室（China Jinping Underground Laboratory，CJPL），其垂直岩石覆盖最薄处达到了2 400 m，成为了目前世界上最深的地下实验室，为我国科学家迅速开展暗物质实验提供了国际一流的极少宇宙线粒子"干扰"的洁净地下实验空间。近十年来，地下实验室继续发展，在原有一期（CJPL-I）的基础上，扩建了可用容积更大的二期实验室（CJPL-II），为更大规模的实验提供了便利的条件[1]。

中国锦屏地下实验室以其得天独厚的低本底环境，吸引了国内众多实验的入驻。其中包括暗物质探测实验、无中微子双β衰变实验、中微子实验、核天体实验等。这些实验的共同点是都需要通过降低本底的方式来获得更好的实验灵敏度。

1　中国锦屏地下实验室（CJPL）

CJPL于2009年5月由清华大学和雅砻江流域水电开发有限公司联合建设，其位于四川锦屏山交通隧道中段[2]。

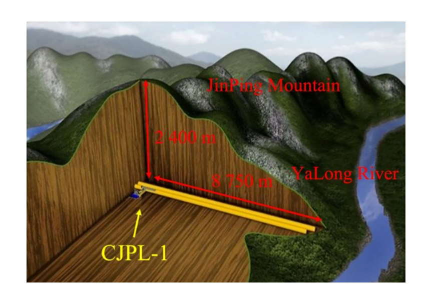


图1　锦屏隧道剖面图[1]
Fig.1　Sectional view of Jinping tunnel[1]

中国锦屏地下实验室目前分为一期实验室（CJPL-I）和二期实验室（CJPL-II）。2010年12月，一期实验室正式投入使用，标志着我国首个极深地下实验室、世界最深的极深地下实验室正式建成。二期工程于2014年8月由清华大学与雅砻江流域水电开发有限公司签署协议，启动建设。其计划修建4组14 m × 14 m × 130 m的实验大厅，总可用容积将从一期工程4 000 m^{3}扩展到约为3×10^5 m^3，地上辅助实验平台建筑面积将达到约4 000 m^3，有望成为世界深地物理实验的中心。目前二期工程正在稳步推进。

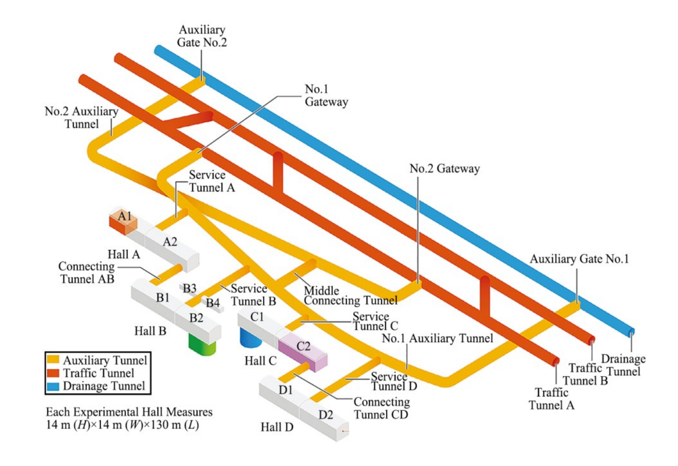


图2　中国锦屏地下实验室二期示意图[3]
Fig.2　Schematic layout of CJPL-II[3]

中国锦屏地下实验室岩石埋深超过2 400 m，是当前世界上岩石埋深最深的地下实验室。极厚的岩石屏蔽了大量的宇宙射线，使实验室的宇宙线通量仅有(61.7 ± 11.7) m^{-2}·a^{-1}，约为地面宇宙线通量的亿分之一[3]。极低的宇宙线本底环境为一系列稀有物理事例探测实验的开展提供了优越的条件。在二期项目建成后，中国锦屏地下实验室将成为世界上岩石埋深最深、宇宙线通量最低、空间最大的深地实验室。图3给出了目前世界上主要的深地实验室的μ子通量、岩石埋深、等效水深和空间大小等比较。途中圆圈大小代表实验室容积，红色代表隧道交通，可以乘车方便出入；蓝色代表竖井交通，运输较大的实验部件时不够方便。

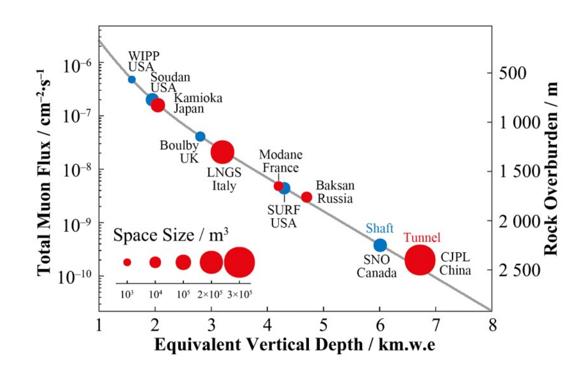


图3　世界地下实验室比较[3]
Fig.3　Global comparison of key underground facilities[3]

中国锦屏地下实验室由于在其中开展的实验的特殊性，对该实验室的各种环境本底的控制都提出了苛刻的要求。表1总结了在一期实验大厅（CJPL-I）中测量的各种环境本底。

由于建设CJPL-I的材料采用了水电站附近的

表 1　CJPL-I 实验大厅中各种环境本底测量结果[3]

Table 1　Environmental background radiation measurements at the experiment hall of CJPL-I[3]

放射性本底 Radiation background	探测技术 Detector	测量结果 Measurements
宇宙线μ子通量 Cosmic muon flux	塑料闪烁体 Plastics scintillator	$(2.0 \pm 0.4) \times 10^{-10}$ cm^{-2}·s^{-1}
基岩放射性 Radiation of rock	高纯锗探测器 HPGe detector	
^{232}Th		0.52~0.64 Bq·kg^{-1}
^{238}U		3.69~4.21 Bq·kg^{-1}
^{40}K		4.28 Bq·kg^{-1}
混凝土放射性 Concrete radiation	高纯锗探测器 HPGe detector	
^{214}Pb		19.88 Bq·kg^{-1}
^{214}Bi		16.03 Bq·kg^{-1}
^{228}Ac		7.38 Bq·kg^{-1}
^{212}Pb		7.48 Bq·kg^{-1}
^{208}Tl		8.15 Bq·kg^{-1}
^{40}K		36.67 Bq·kg^{-1}
空气吸收剂量率 Air absorb dose rate	电离室 Ionization chamber	
主大厅 Main hall		19.27 nGy·h^{-1}
聚乙烯室内 In PE room		0.43 nGy·h^{-1}
空气氡浓度 Air radon levels	测量α粒子的电离室 Ionization chamber for α particles	
2010.12~2011.9		
不通风状态 No ventilation		(101 ± 14) Bq·m^{-3}
通风状态 Ventilation		(86 ± 25) Bq·m^{-3}
2015.1~2015.12		
不通风状态（1~3 月）No ventilation (Jan. to Mar.)		(108 ± 50) Bq·m^{-3}
通风状态（4~12 月）Ventilation (Apr. to Dec.)		(45 ± 28) Bq·m^{-3}
中子 Neutrons		
热中子 Thermal neutron	^{3}He正比管 Proportional counting tube	$(4.00 \pm 0.08) \times 10^{-6}$ cm^{-2}·s^{-1}
	多球中子谱仪 Multiple spherical neutron spectrometer	$(7.03 \pm 1.81) \times 10^{-6}$ cm^{-2}·s^{-1}
快中子 Fast neutron	液体闪烁体 Liquid scintillator	$(1.50 \pm 0.07) \times 10^{-7}$ cm^{-2}·s^{-1}
	多球中子谱仪 Multiple spherical neutron spectrometer	$(3.63 \pm 2.77) \times 10^{-6}$ cm^{-2}·s^{-1}
总中子通量 Total neutron flux	多球中子谱仪 Multiple spherical neutron spectrometer	$(2.69 \pm 1.02) \times 10^{-5}$ cm^{-2}·s^{-1}

原料，并没有做特别的放射性控制，导致 CJPL-I 的放射性水平相比于其他地下实验室略高。在建设 CJPL-II 时，测量了多个混凝土样品的放射性水平。建设时只使用低放射性的混凝土。如表 2 所示，CJPL-II 的环境本底水平优于 CJPL-I[4]。

表 2　CJPL-I 与 CJPL-II 的部分本底测量结果[4]

Table 2　Background radiation measurements of CJPL-I and CJPL-II[4]

	环境γ本底 Environmental γ radiation background 60~2 700 keV·s^{-1}	混凝土放射性 Concrete radiation / Bq·kg^{-1}		
		^{238}U	^{232}Th	^{40}K
CJPL-I	73.4	18.0	7.6	36.7
CJPL-II	46.8	6.8 ± 1.5	5.4 ± 0.6	81.9 ± 14.4

2016 年，在锦屏地下实验室一期、二期工程的基础上，清华大学联合雅砻江流域水电开发有限公司提出建设“极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施”（简称锦屏大设施），2018 年 12 月锦屏大设施项目可行性研究报告获得国家发展和改革委正式批复，2019 年 7 月 20 日，锦屏大设施项目正式启动。

锦屏大设施是“十三五”时期国家优先安排建设的重大科技基础设施，是国内第一个极深地下实验室基础设施建设项目，也是国际上第一次大规模建设具有极低辐射本底极端条件的综合实验设施。锦屏大设施的建设将为我国的粒子物理、核天体物理、深地辐射生物学等提供国际最一流的实验平台。2020年12月，锦屏大设施正式开工建设，主要建设内容为4大平台，利用中国锦屏地下实验室二期所开挖空间，建设地下实验综合运行维护支持平台、极深地下极低辐射本底辐射屏蔽平台、极深地下极低本底分析测试平台，同时配套建设地上辅助实验平台。预计锦屏大设施将于2024年完成建设投入运行，将形成具有全世界最深、辐射屏蔽水平最高、放射性材料筛选能力最强和配套服务最完善的极深地下极低辐射本底物理实验综合平台，全面提升我国科研支撑能力[5−6]。

对于深地实验室，在保证实验室内极低放射性本底水平的情况下，交通的便利性也是衡量深地实验室的一个重要指标。中国锦屏地下实验室有得天独厚的地理优势，其交通十分便利。实验室建设在锦屏山交通隧道中段，距离隧道东端（西端）仅有8.7 km（8.8 km）。实验人员可以直接坐车进出实验室。同时交通隧道空间充足，可允许施工车辆通行，极大便利了大型物理实验的建设。同时，CJPL对外的交通也十分便利。其距离西昌市青山机场仅有150 km。机场到实验室有高速路及和雅砻江流域水电开发有限公司共用的专用车道。从机场到实验室仅有约2 h车程，十分便利。

中国锦屏地下实验室极大推动了我国的深地科学研究的发展，如暗物质探测、无中微子双β衰变（0νββ）探测、中微子探测等，为我国深地科研事业搭建了从零到一的实验平台。目前在CJPL开展的实验有中国暗物质实验（China Dark Matter Experiment，CDEX）、粒子和天体物理氙实验（Particle and Astrophysical Xenon Experiments，PandaX）、Jinping neutrino experiment、锦屏深地核天体物理实验装置（Jinping Underground Nuclear Astrophysics Experiment，JUNA）等实验。相信在未来还有更多实验组入驻CJPL。

2 CJPL中的实验项目

2.1 CDEX实验

CDEX合作组由清华大学领导，采用点电极高纯锗探测器阵列对暗物质和无中微子双β衰变事例展开探测。高纯锗探测器是一种半导体探测器，具有本底低、能量分辨率好、能量阈值低、容易扩展探测器等优点，是探测稀有物理事例的理想探测器。暗物质探测实验和无中微子双β衰变实验就是两种典型的稀有物理事例实验。

暗物质是宇宙中仅参与引力相互作用，而不参与电磁相互作用和强相互作用的一种物质，因此难以被探测到。实验上可以采用探测暗物质与靶核发生弱相互作用而引起的核反冲来探测暗物质，称为直接探测。由于反应截面极低，上述反应的事例率很小，因此需要降低本底对事例率的影响。CDEX实验组采用自身本底极低的高纯锗探测器，并将其置于锦屏地下实验室、外部加屏蔽体、控制探测器支撑结构放射性以及使用反符合探测等方法进一步将探测器在0~2 keV能区的本底事例率控制在2 count·kg^{-1}·keV^{-1}·d^{-1}的水平。同时点电极探测器具有的低能量阈值属性在探测10 GeV·c^{-2}以下的轻暗物质方面具有优势，实验组将探测器能量阈值降低到了160 eVee水平，在国际上处于领先水平。

无中微子双β衰变实验是指在某些核素发生双β衰变时不放出中微子，仅放出两个电子的过程。该实验可以证明中微子是马约拉纳粒子，从而超越标准模型。双β衰变的半衰期在10^{20} a以上，而无中微子双β衰变半衰期又远大于此，所以无中微子双β衰变同样是稀有物理事例。^{76}Ge是一种可以发生双β衰变的核素，且具有自然丰度高、易于富集的特点，因此富集^{76}Ge的高纯锗探测器非常适合进行无中微子双β衰变实验。由于没有中微子携带能量，无中微子双β衰变产生的两个电子会携带全部衰变能量，对^{76}Ge而言，会产生一个2 039 keV的单能峰。因此，与暗物质探测实验主要关注低能区不同，无中微子双β衰变实验主要关注2 000 keV以上的高能区。

CDEX合作组自2009年成立以来，在使用高纯锗探测器进行暗物质等稀有事例探测方面取得了长足的进展，探测器质量从20 g的CDEX-0提升到单体质量约1 kg的CDEX-1A和CDEX-1B，再到采用探测器阵列技术，总质量达到10 kg的CDEX-10，并给出了国际领先的物理结果。2018年，实验组对弱相互作用大质量粒子（Weakly Interacting Massive Particles，WIMPs）模型的分析给出4~5 GeV·c^{-2}以下自旋无关国际上最灵敏的实验结果[7]（图4(a)）；2019年基于CDEX-1B四年的实验数据对暗物质年度调制效应进行研究，并在6 GeV·c^{-2}以下质量范围给出了国际上最好的排除水平[8]（图4(b)）。同时，实验组也在WIMP粒子非弹性散射、轴子和类轴子、暗光子等模型的分析中达到或超过国际最灵敏水

平。在无中微子双β衰变实验方面，实验组采用CDEX-1实验数据对无中微子双β衰变能区进行分析，给出了我国首个自主^{76}Ge无中微子双β衰变研究结果，给出了半衰期下限$T_{1/2}^{0\nu} \geqslant 6.43 \times 10^{22}$ a，90% C.L.[9](图4(c))。

目前，实验组正在针对低本底材料制备[10]、宇生放射性控制[11]、锗晶体生长、探测器设计与制作、探测器特性表征与波形甄别[12-14]等方面进行一系列关键技术研究，为未来更大规模更低本底高纯锗阵列实验奠定实验基础。

未来，实验组计划使用CJPL二期C1实验大厅空间，将探测器裸浸于13 m×13 m的液氮中央，以实现对探测器的冷却和对外部环境本底的屏蔽，预期使2 MeV附近的本底水平最终达到10^{-4} count·kg^{-1}·keV^{-1}·a^{-1}的水平。将使用^{76}Ge富集探测器，并进一步增加探测器阵列质量到300 kg乃至10^3 kg量级，并使用^{76}Ge富集探测器，将无中微子双β衰变半衰期下限提升到10^{27} a乃至10^{28} a水平[15]。

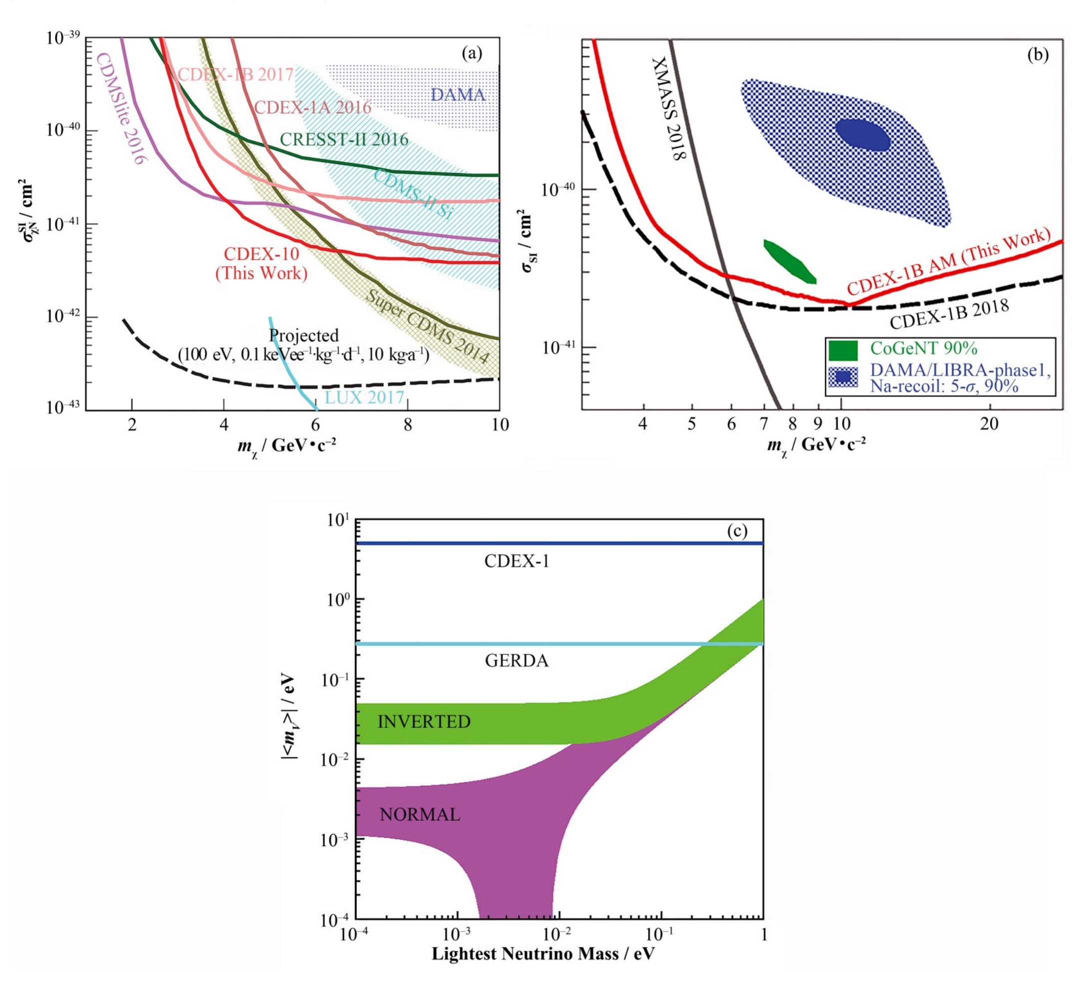


图4 CDEX稀有物理事例探测结果

(a) CDEX-10自旋无关WIMPs分析结果[7]，(b) 暗物质年度调制效应分析结果[8]，(c) 无中微子双β衰变分析结果[9]

Fig.4 Rare physical event detections by CDEX

(a) Spin Independent (SI) χ - N coupling results from CDEX-10[7], (b) Dark matter results by annual modulation analyses[8], (c) Results from neutrinoless double-beta decay[9]

2.2 PandaX实验

PandaX合作组成立于2009年，采用气液二相型液氙时间投影室探测器对暗物质进行直接探测。二相型液氙时间投影室结构如图6所示，液氙中发生的电离事例产生激发态氙原子和电子-离子对。其中激发态氙退激和电子离子的重结合产生的闪烁光构成S1信号，电子在漂移电场和萃取电场下进入气氙中产生电致发光现象，构成S2信号[16]。因此，二相型液氙时间投影室可以对同一事例产生两路信号，对事例三维位置重建和甄别电子与核反冲事例具有天然优势。同时，由于氙的原子质量大，反应截面高，对质量在100 GeV·c^{-2}附近的WIMPs粒子具有较高的反冲事例率和实验灵敏度。

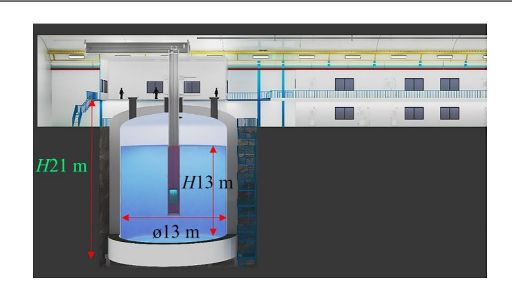


图5 CDEX-300实验装置计划图
Fig.5 Schematic layout of the CDEX-300 experimental program

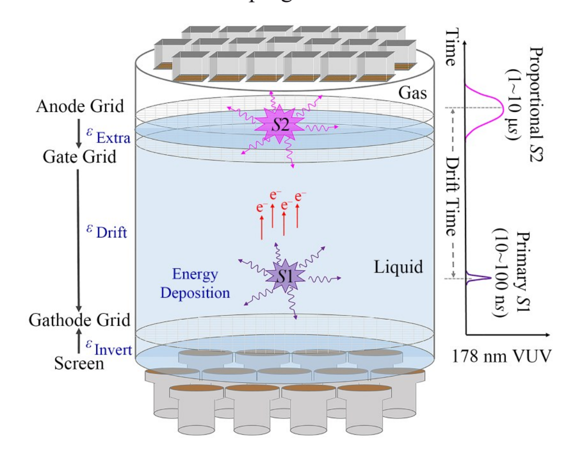


图6 气液二相型氙时间投影室示意图[16]
Fig.6 Schematic of a dual-phase liquid xenon detector[16]

PandaX合作组自2009年至今也完成了对探测器质量的多次升级。在目前已经结束运行的一期实验PandaX-I和二期实验PandaX-II中，探测器液氙有效质量分别达到120 kg和580 kg。取得了国际领先的成果。PandaX于2016年和2017年公布的3.3×10^4 kg·d和5.4×10^4 kg·d的低本底数据均取得国际上最好的排除线结果，结束运行时总曝光量为1.32×10^5 kg·d，并将30 GeV·c^{-2}处的暗物质反应截面上限下推到2.2×10^{-46} cm^2[17]（图7）。

目前正在运行的PandaX-4T实验是对PandaX-II实验的进一步升级，其液氙有效质量达到了4 000 kg。该实验装置位于CJPL-II的B2实验大厅中。探测器被置于低温恒温器中，以保持−100 ℃的低温环境，恒温器则置于高纯水屏蔽体中，用于去除环境中γ射线与中子本底。PandaX-4T实验于2020年建成，于同年11月开始试运行，首阶段采数94.9 d，总曝光量0.63×10^3 kg·d。通过分析该阶段实验数据，实验组将与中子和质子自旋相关的WIMPs暗物质粒子的反应截面下推至5.8×10^{-42} cm^2和1.7×10^{-40} cm^2[18]，并给出无中微子双β衰变的半衰期下限为2.27×10^{21} a[19]。

同时，PandaX-III项目计划利用200~1 000 kg的

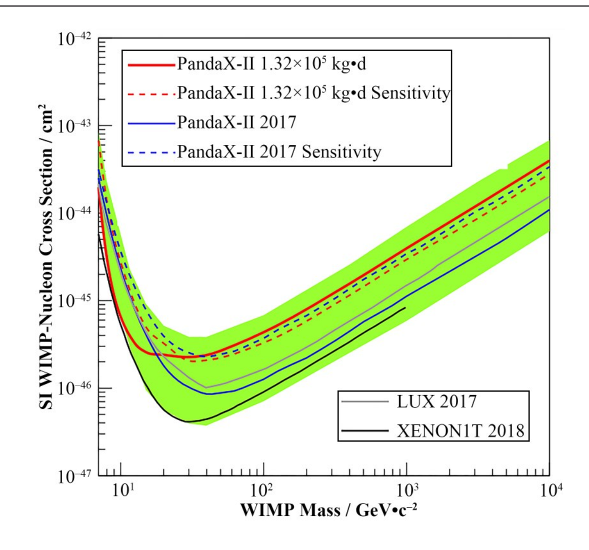


图7 PandaX-II对WIMPs粒子分析结果[17]
Fig.7 PandaX-II upper limit for WIMPs cross section[17]

高压气氙对^{136}Xe无中微子双β衰变展开探测，并为此设计出一个包含1 MPa气压20 kg气体的原型探测器进行验证。该探测器从2016年起开始试运行，对探测器使用工作气体、探测器径迹记录能力等指标进行了验证，并基于此给出了PandaX-III的预期目标，可以将2 457 keV附近本底降到3.5×10^{-3} count·kg^{-1}·keV^{-1}·a^{-1}水平，并将^{136}Xe的无中微子双β衰变半衰期下限提高到8.5×10^{25} a。

2.3 JUNA核天体实验

JUNA是由中国原子能科学研究院领导的我国首个深地核天体实验项目。核天体物理实验主要关注宇宙中不同元素形成的过程，研究的反应包括^{12}C(α, γ)^{16}O、^{13}C(α, n)^{16}O、^{25}Mg(p, γ)^{26}Al、^{19}F(p, α)^{16}O和^{19}F(p, γ)^{20}Ne等多种核反应[20−22]。该项目于2020年入驻锦屏地下实验室二期，并于同年12月实现了实验所需氢氦离子加速器的出束。实验组建成的加速器可以产生氢离子、氦离子等多种离子束，并实现了能量在70~400 keV范围内连续可调，为实验的顺利进行奠定了基础。

锦屏地下实验室对环境γ射线和中子具有良好的屏蔽效果，而实验正需要对核反应产生的γ和中子等粒子进行探测，因此地下实验有利于减少实验本底，给出更灵敏的实验结果。2021年12月，JUNA实验给出了第一批实验成果，在灵敏度与精度方面为国际最高水平[23]。对目前尚未探测到过的"圣杯反应"：^{12}C(α, γ)^{16}O给出538 keV处的反应截面上限10^{-36} cm^2，达到国际领先水平。同时对其他核反应给出其对应能区的计数率与本底，如表3所示。

表3 JUNA 4种反应的实验参数[23–25]
Table 3 Basic parameters of the four reactions[23–25]

核反应 Reaction	束流 Beam	束流强度 Intensity / emA	关注能区 $E_{c.m.}$ / keV	靶密度 Target thickness	探测效率 Efficiency / %	计数率 Counts / d^{-1}	本底 BKG / d^{-1}
$^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$	$^4He^{2+}$	1	538	10^{18} atoms·cm^{-2}	60	—	1.2
$^{13}C(\alpha,n)^{16}O$	$^4He^{1+,2+}$	2	230~600	2 mm	26	97±24	133±5
$^{25}Mg(p,\gamma)^{26}Al$	$^1H^{1+}$	2	$E_x = 92$	60 μg·cm^{-2}	38	200	10
$^{19}F(p,\alpha)^{16}O$	$^1H^{1+}$	0.5~1.0	72~344	4 μg·cm^{-2}	60	24	1

2.4 中微子实验

锦屏中微子实验由清华大学领导，希望在锦屏以建设一个百吨级液闪实验开展太阳中微子、地球中微子等多物理目标研究并达到世界领先[26]。锦屏实验室具有最低的反应堆中微子本底、最大的地壳地球中微子信号、最低的环境放射性、最长的太阳中微子过地距离等特点[27]，为进行低能中微子实验提供极大便利。锦屏中微子实验组首先设计了一个吨量级原型探测器对实验性能进行验证[28]，实验装置位于CJPL-I实验大厅中，其结构如图8所示。球体中心装有10^3 kg的液体闪烁体，可以在发生核反应时产生闪烁光。30个光电倍增管均匀覆盖在球体外沿，将闪烁光信号转化为电信号[29]。球体和外部不锈钢容器之间装有高纯度纯净水以实现对环境本底的屏蔽。

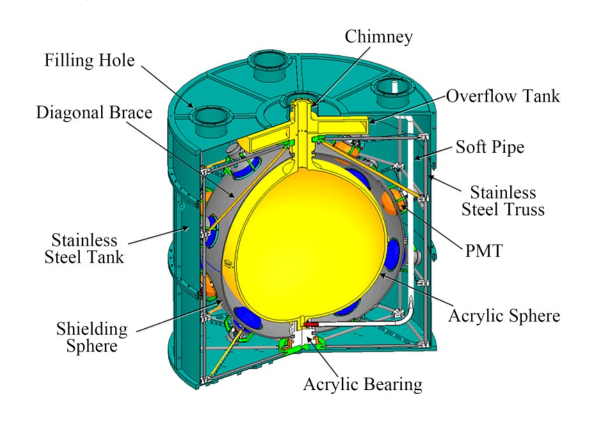


图8 中微子实验液闪探测器原型机
Fig.8 Prototype of 1-ton neutrino experiment

未来，锦屏中微子实验预期能够实现太阳中微子、地球中微子、超新星和超新星遗迹中微子等方面的物理目标。在太阳中微子实验中，可以精确测定太阳中微子振荡从真空到物质效应转换的过渡过程，可以验证中微子物质效应的相关理论。同时对于太阳中碳氮氧聚变循环过程的中微子的探测，可以解决太阳核心金属元素丰度的问题。在地球中微子方面，锦屏中微子实验能清晰地区分铀与钍衰变链的成分，其测量结果与Borexino和KamLAND实验的结果相结合，就可以确定来自地幔的中微子通量，从而揭示地球板块形成、山体运动的机理和产热元素的分布。

2.5 总结与展望

CDEX、PandaX、JUNA、锦屏中微子等实验组利用CJPL的实验环境，在暗物质、无中微子双β衰变、地球中微子探测等实验上均取得了与国外同类实验相比领先或持平的实验结果，证明了锦屏地下实验室在低本底方面的优异表现。目前，CJPL-II各实验大厅也即将施工完成。作为目前世界上最大的地下实验室，CJPL-II为更大规模的实验提供了理想的场地。CDEX合作组的CDEX-300、CDEX-1T项目已计划于CJPL-II开始建设，PandaX合作组的PandaX-4T项目已完成建设并开始运行。通过增加探测器灵敏体积的方式，两实验组均期望能提高探测器的灵敏度、降低本底，从而在暗物质探测与无中微子双β衰变领域取得领先成果。JUNA实验组在CJPL-II搭建了我国首个能量连续可调的400 keV量级氢氦离子加速器，下一步计划建造MeV量级强流高精度静电加速器，以期取得更为优异的结果，并推动我国在加速器领域的技术突破。锦屏中微子实验在使用原型机实现实验验证后，计划在CJPL-II进行更大规模实验装置的建设。预期建成一个总液闪质量达到2×10^6 kg的球形探测器，从而实现更为灵敏的中微子探测结果。

同时，更多种类的实验也计划利用CJPL-II低本底和大空间的优点，例如放射生物学剂量-效应研究实验就计划利用锦屏地下实验室排除宇宙射线的照射，从而揭示低剂量率下的剂量-效应的客观规律，为人类放射治疗癌症提供更可靠的科学依据。

随着锦屏地下实验室二期及锦屏大设施的建设完成，中国锦屏地下实验室将成为国际最优秀的深地综合实验平台。其将服务于粒子物理、核天体物理、深地辐射生物学等多个学科及研究方向，推动我国深地科研事业蓬勃发展。

3 结语

中国锦屏地下实验室的建成和扩建，为越来越

多的低本底实验提供了更优秀的实验条件。CDEX实验、PandaX实验、JUNA实验、锦屏中微子实验等已经在锦屏实验室开展实验并取得了国际领先水平的实验结果，证明了锦屏地下实验室优异的低本底条件，是培养更多实验项目、取得更优秀实验成果的温床。未来，随着CJPL-II的进一步完全建成，原有实验组会在更大的实验空间中实现更大质量的探测器运行取数，给出稀有物理事例探测的更灵敏结果。同时，也会有更多实验组入驻锦屏，为我国前沿物理实验研究的推进提供助力。

致谢　感谢CJPL及其工作人员对CDEX、PandaX、JUNA、锦屏中微子等实验项目的支持。CJPL由清华大学和雅砻江流域水电开发有限公司联合建设和运行。

作者贡献声明　王钰锋、刘家璇负责文章的撰写与修改；杨丽桃负责文章的审阅与修改，参与实验室建设与实验研究；曾志、马豪、岳骞负责实验室设计与建设、项目的指导和管理。

参考文献

1　杨丽桃. 基于CDEX-1B点电极高纯锗探测器的暗物质直接探测[D]. 北京: 清华大学, 2017.
YANG Litao. Direct detection of dark matter based on CDEX-1B point electrode high purity germanium detector [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

2　中国锦屏地下实验室[EB/OL]. http://cjpl.tsinghua.edu.cn/.
China Jinping Underground Laboratory[EB/OL]. http://cjpl.tsinghua.edu.cn/.

3　Cheng J P, Kang K J, Li J M, *et al*. The China Jinping underground laboratory and its early science[J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2017, **67**(1): 231 – 251. DOI: 10.1146/annurev-nucl-102115-044842.

4　余泽. 基于低阈值高纯锗探测器的暗光子直接探测研究[D]. 北京: 清华大学, 2022.
SHE Ze. Direct detection of Dark Photon with low threshold high purity germanium detectors[D]. Beijing: Tsinghua University, 2022.

5　岳骞. 我国的深地实验室CJPL和CDEX暗物质直接探测实验[J]. 现代物理知识, 2018, **30**(2): 14 – 22. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.02.004.
YUE Qian. CJPL and CDEX dark matter direct detection experiments in China's deep laboratory[J]. Modern Physics, 2018, **30**(2): 14 – 22. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.02.004.

6　程建平, 李元景, 曾志. 暗物质直接探测实验辐射本底研究: 以锦屏大设施项目为例[J]. 实验技术与管理, 2021, **38**(7): 1 – 10. DOI: 10.16791/j. cnki. sjg. 2021.07.001.
CHENG Jianping, LI Yuanjing, ZENG Zhi. Research on radioactive background of dark matter direct detection experiment: taking Jinping underground facility project as example[J]. Experimental Technology and Management, 2021, **38**(7): 1 – 10. DOI: 10.16791/j. cnki. sjg. 2021.07.001.

7　Jiang H, Jia L P, Yue Q, *et al*. Limits on light weakly interacting massive particles from the first 102.8 kg×day data of the CDEX-10 experiment[J]. Physical Review Letters, 2018, **120**(24): 241301. DOI: 10.1103/physrevlett.120.241301.

8　Yang L T, Li H B, Yue Q, *et al*. Search for light weakly-interacting-massive-particle dark matter by annual modulation analysis with a point-contact germanium detector at the China Jinping underground laboratory[J]. Physical Review Letters, 2019, **123**(22): 221301. DOI: 10.1103/physrevlett.123.221301.

9　Wang L, Yue Q, Kang K J, *et al*. First results on ^{76}Ge neutrinoless double beta decay from CDEX-1 experiment [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2017, **60**(7): 071011. DOI: 10.1007/s11433-017-9038-4.

10　Zhang S J, Liu Y Y, Lv S S, *et al*. Surface metallization of PTFE and PTFE composites by ion implantation for low-background electronic substrates in rare-event detection experiments[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(7): 90. DOI: 10.1007/s41365-022-01068-0.

11　Zeng W H, Ma H, Zeng M, *et al*. Evaluation of cosmogenic activation of copper and germanium during production in Jinping Underground Laboratory[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, **31**(5): 50. DOI: 10.1007/s41365-020-00760-3.

12　Zeng Z, Mi Y H, Zeng M, *et al*. Characterization of a broad-energy germanium detector for its use in CJPL[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, **28**(1): 7. DOI: 10.1007/s41365-016-0162-y.

13　Jia H T, Lin S T, Liu S K, *et al*. High-accuracy measurement of Compton scattering in germanium for dark matter searches[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(12): 157. DOI: 10.1007/s41365-022-01148-1.

14　Li R M J, Liu S K, Lin S T, *et al*. Identification of anomalous fast bulk events in a p-type point-contact germanium detector[J]. Nuclear Science and Techniques,

2022, **33**(5): 57. DOI: 10.1007/s41365-022-01041-x.

15 Ma J L, Yue Q, Lin S, *et al*. Study on cosmogenic activation in germanium detectors for future tonne-scale CDEX experiment[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2019, **62**(1): 011011. DOI: 10.1007/s11433-018-9215-0.

16 Ni K X. Development of a liquid xenon time projection chamber for the xenon dark matter search[D]. New York: Columbia University, 2006.

17 Wang Q H, Abdukerim A, Chen W, *et al*. Results of dark matter search using the full PandaX-II exposure[J]. Chinese Physics C, 2020, **44**(12): 125001. DOI: 10.1088/1674-1137/abb658.

18 Huang Z, Han C C, Abdukerim A, *et al*. Constraints on the axial-vector and pseudo-scalar mediated WIMP-nucleus interactions from PandaX-4T experiment[J]. Physics Letters B, 2022, **834**: 137487. DOI: 10.1016/j.physletb.2022.137487.

19 Si L, Cheng Z K, Abdukerim A, *et al*. Determination of double beta decay half-life of ^{136}Xe with the PandaX-4T natural xenon detector[J]. Research, 2022, **2022**: 9798721. DOI: 10.34133/2022/9798721.

20 柳卫平, 李志宏, 何建军, 等. 锦屏深地核天体物理实验(JUNA)进展[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(10): 1729–1741. DOI: 10.7538/yzk.2019.53.10.1729.

LIU Weiping, LI Zhihong, HE Jianjun, *et al*. Progress of Jinping underground nuclear astrophysics experiment (JUNA) [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(10): 1729–1741. DOI: 10.7538/yzk.2019.53.10.1729.

21 Zhang L Y, He J J, de Boer R J, *et al*. Measurement of ^{19}F(p, γ)^{20}Ne reaction suggests CNO breakout in first stars [J]. Nature, 2022, **610**(7933): 656–660. DOI: 10.1038/s41586-022-05230-x.

22 Kajino T. Underground laboratory JUNA shedding light on stellar nucleosynthesis[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(3): 42. DOI: 10.1007/s41365-023-01196-1.

23 Liu W P, Li Z H, He J J, *et al*. Progress of underground nuclear astrophysics experiment JUNA in China[J]. Few-Body Systems, 2022, **63**: 43. DOI: 10.1007/s00601-022-01735-3.

24 Su J, Zhang H, Li Z H, *et al*. First result from the Jinping Underground Nuclear Astrophysics experiment JUNA: precise measurement of the 92 keV ^{25}Mg(p, γ)^{26}Al resonance[J]. Science Bulletin, 2022, **67**(2): 125–132. DOI: 10.1016/j.scib.2021.10.018.

25 Gao B, Jiao T Y, Li Y T, *et al*. Deep underground laboratory measurement of ^{13}C(α, n)^{16}O in the Gamow windows of the *s* and *i* processes[J]. Physical Review Letters, 2022, **129**(13): 132701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.129.132701.

26 程建平, 柳卫平, 岳骞, 等. 深地前沿物理研究中的关键科学问题[J]. 中国科学基金, 2022, **36**(3): 447–459. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2022.03.010.

CHENG Jianping, LIU Weiping, YUE Qian, *et al*. Key scientific issues in the research of deep underground frontier physics[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, **36**(3): 447–459. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2022.03.010.

27 Beacom J F, Chen S M, Cheng J P, *et al*. Physics prospects of the Jinping neutrino experiment[J]. Chinese Physics C, 2017, **41**(2): 023002. DOI: 10.1088/1674-1137/41/2/023002.

28 Wang Z Y, Wang Y Q, Wang Z, *et al*. Design and analysis of a 1-ton prototype of the Jinping Neutrino Experiment [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, **855**: 81–87. DOI: 10.1016/j.nima.2017.03.007.

29 Li Z Y, Zhang Y M, Cao G F, *et al*. Event vertex and time reconstruction in large-volume liquid scintillator detectors [J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(5): 49. DOI: 10.1007/s41365-021-00885-z.